

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Котляра Володимира Вікторовича

«Електромагнітні процеси за участю тричастинкових систем»,
яка представлена на здобуття наукового ступеня кандидата фізико–
математичних наук (спеціальність 01.04.02 – «теоретична фізика»)

Процеси радіаційного захоплення, фото- та електророзщеплення атомних ядер є важливими засобами для вивчення структури зв'язаних станів нуклонів та сил, що діють між нуклонами. Дво- та тричастинкові ядра становлять особливий інтерес, оскільки для систем двох та трьох нуклонів є можливості розрахувати хвильові функції таких ядер та знайти розв'язки рівнянь для станів безперервного спектру з використанням реалістичних моделей взаємодії між нуклонами. Дисертаційну роботу присвячено розвитку методів у теорії електромагнітної взаємодії за участю систем трьох частинок. Для знаходження добре обґрунтованих передбачень та інтерпретації результатів вимірювань спостережуваних в процесах, які вивчаються в дисертаційній роботі, є важливим використання електромагнітного струму системи взаємодіючих нуклонів, що містить внески струмів взаємодії та задовольняє рівнянню безперервності з гамільтоніаном ядра, разом з початковими та кінцевими станами реакцій, які є власними функціями цього гамільтоніану. В роботі досліджується вплив струмів взаємодії на спостережувані в двочастинковому розщепленні ядра реальними та віртуальними фотонами, а також в зворотній до фоторозщеплення реакції радіаційного захоплення протонів дейтронами та вивчається залежність спостережуваних від компонент хвильової функції ядра ${}^3\text{He}$. З метою скористатися в дослідженнях досягненнями в вирішенні рівнянь фаддєєвського типу для тринуклонних ядер, а також для урахування протон–дейтронного перерозсіяння в амплітудах реакцій в роботі розроблюються нові методи, які успішно застосовуються в розрахунках спостережуваних.

Актуальність теми дисертації. Дослідження, що виконано в роботі, дають нові знання про механізми поглинання фотонів атомними ядрами та про залежність перерізів реакцій від структури зв'язаного стану трьох нуклонів. Крім того, на основі проведених розрахунків надано інтерпретацію результатам експериментів у Харкові та в декількох наукових центрах за межами України. Тема роботи є, безумовно, важливою та актуальною з точки зору теоретичної та ядерної фізики, а також для практичних застосувань.

Актуальність досліджень, які проведено в дисертації, підтверджується також тим, що вони є складовою частиною низки науково-дослідних робіт та проектів, які виконувалися в Інституті теоретичної фізики імені О.І. Ахієзера національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, та в яких дисертант виступав у ролі виконавця.

Структура дисертації. За змістом і структурою дисертаційна робота повністю відповідає вимогам до кандидатських дисертацій. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 197

найменувань та чотирьох додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 192 сторінки друкованого тексту.

У **вступі** наведено обґрунтування вибору теми роботи та її актуальності; сформульовано мету досліджень та основні завдання; викладено основні здобуті результати, розкрито їх наукову новизну та практичне значення; відзначено особистий внесок здобувача; вказано, на яких конференціях і семінарах доповідались та були апробовані матеріали дисертації.

У **першому розділі** надано стислий огляд досягнень та невирішених проблем в теорії електромагнітної взаємодії за участю тринуклонних ядер. Аналізуються результати досліджень, в яких обчислення проводилися з розв'язками рівнянь Фаддеева для зв'язаного стану трьох нуклонів з реалістичними міжнуклонними потенціалами. Основна увага приділяється дослідженням з використанням електромагнітних струмів, які генеруються обміном мезонами, та підкреслюється важливість узгодження моделей струмів взаємодії та ядерних сил. Обговорюються дослідження електромагнітних процесів за участю тринуклонних ядер з розв'язками рівнянь фаддеевського типу для станів безперервного спектру. Такі дослідження проводилися з одночастинковими струмами. В цьому розділі обґрунтовується актуальність розробки нових методів для вивчення електромагнітної взаємодії за участю тринуклонних систем з використанням розв'язків рівнянь фаддеевського типу для початкових та кінцевих станів разом з мезонними обмінними струмами та проведення відповідних розрахунків спостережуваних.

У **другому розділі** розглянуто підхід для обчислення амплітуд двочастинкового фоторозщеплення ядра ${}^3\text{He}$, на основі якого одночастинкові та двочастинкові механізми реакції можуть бути урахованими в рамках плоскохвильового наближення для кінцевого протон–дейтронного стану. В розділі також коротко обговорюється модель ядерного струму, що використовується в даній роботі. Наведений метод було розроблено в попередніх роботах за участю автора. Метод обчислення амплітуд засновується на використанні векторних змінних. Використання цього методу не потребує залучення мультипольних розкладів для ядерного струму. Метод показав свою ефективність в обчисленнях спостережуваних в двочастинковому фоторозщепленні ядра ${}^3\text{He}$ у широкому інтервалі енергії нижче та вище порогу народження π -мезонів. Цей підхід отримав подальший розвиток в розділах 4 та 5.

У **третьому розділі** знайдено та детально досліджено тензорне представлення для хвильової функції зв'язаного стану трьох нуклонів, яке є новим, та вивчено поляризації нуклонів та імпульсні розподіли нуклонів і протон–дейтронних кластерів, що залежать від проекцій спінів, в орієнтованих тринуклонних ядрах. Розраховані імпульсні розподіли порівнюються з результатами інших авторів та експериментальними даними. Результати, що знайдено в розділі 3, тензорне представлення для хвильової функції та методи, що розроблено для обчислення та аналізу імпульсних розподілів нуклонів і pd -кластерів, використовуються в розділах 4 та 5 для дослідження амплітуд радіаційного захоплення протонів дейтронами та двочастинкового фоторозщеплення ядра ${}^3\text{He}$. Вивчення імпульсних розподілів, яке проведено в розділі 3, служить

важливим засобом контролю програм для обчислення значень хвильової функції, яка залежить від векторів відносних імпульсів, і методів багатовимірної числової інтеграції. Ці методи використовуються в розділах 4 та 5 з підінтегральними функціями, які містять крім хвильових функцій також матричні елементи операторів електромагнітного струму системи взаємодіючих нуклонів.

Четвертий розділ присвячено розвиненню методів, які забезпечують включення мезонних обмінних струмів до розрахунків амплітуд в імпульсному представленні з використанням числових розв'язків рівнянь фаддєєвського типу для зв'язаних станів та станів розсіяння трьох нуклонів. Відповідні матричні елементи мають вигляд багатовимірних інтегралів. Ці матричні елементи було трансформовано та спрощено з використанням методів квантової теорії кутового моменту та спеціальних функцій математичної фізики. Розроблено два підходи, які відрізняються за своєю ефективністю. Показано, що результати обчислень з їх використанням збігаються. Таким чином, в тому числі, забезпечується достовірність числових розрахунків, які потребують значних комп'ютерних ресурсів. В розділі також послідовно побудовано мультипольні розклади для Фур'є образу ядерного струму. На основі розвинутого формалізму ці розклади перетворено з метою врахування частини вкладів багаточастинкових струмів взаємодії в мультиполях електричного типу. Останні виражено в термінах матричних елементів зарядової щільності за допомогою рівняння безперервності. Форма, в якій знайдено мультипольне представлення для струму ядра, дозволяє проводити розрахунки в імпульсному представленні для станів нуклонів без залучення довгохвильового наближення. Побудоване перетворення становить альтернативний шлях урахування струмів взаємодії та є аналогом теореми Зігерта. З порівняння спостережуваних в радіаційному захопленні протонів дейтронами при енергіях нижче порогу народження π -мезонів, що отримано з явними конструкціями мезонних обмінних струмів і за допомогою аналога теореми Зігерта, вказано кінематичну область, в якій обидва підходи дають близькі результати. Розроблені методи та результати розрахунків диференціальних перерізів та поляризаційних спостережуваних є новими.

У п'ятому розділі досліджуються механізми двочастинкового фоторозщеплення ядра ${}^3\text{He}$ поблизу та вище цього порогу народження π -мезонів, що доповнює вивчення впливу мезонних обмінних струмів на спостережувані в радіаційному захопленні протонів дейтронами при енергіях нижче цього порога, які було проведено в попередньому розділі. Ядерний струм, з яким розраховано амплітуди реакції, містить одночастинкові конвекційні та спінові струми, двочастинкові мезонні обмінні струми, які генеруються обміном π -мезонами, а також струм, що описує спін-орбітальну електромагнітну взаємодію з нуклонами. Обчислення проведено з тензорною хвильовою функцією зв'язаного стану трьох нуклонів та антисиметризованим добутком хвильових функцій дейтрона та протона для кінцевого стану реакції. Вперше проведено детальний аналіз залежності спостережуваних від компонент хвильової функції ядра ${}^3\text{He}$ на основі розрахунків з включенням мезонних обмінних струмів. Серед нових результатів, що отримано в цьому розділі,

відзначимо заповнення провалу в енергетичній залежності диференціального перерізу, що знайдено в S-хвильовому наближенні, завдяки двочастинковим механізмам фотопоглинання. Вперше показано, що тринуклонні стани з повними кутовими моментами в двочастинковій підсистемі $J > 2$ мають незначний вплив на диференціальні перерізи та коефіцієнт асиметрії в двочастинковому фоторозщепленні ядра ${}^3\text{He}$ лінійно-поляризованими фотонами в області енергій фотонів до 300 MeV. Цей результат дає підстави стверджувати, що використовувані розв'язки рівнянь Фаддєєва для хвильової функції ядра ${}^3\text{He}$ з $J = 0, \dots, 4$ є достатньо повними для обґрунтованого аналізу спостережуваних в зазначеній кінематичній області.

Розроблено нову модель мезонних обмінних струмів, яка включає в теорію ефекти сходу з енергетичної оболонки при поглинанні реальних або віртуальних фотонів системою взаємодіючих нуклонів, що знаходяться на масовій оболонці. Показано, що внаслідок розглянутих ефектів зміни перерізу за величиною є порівняними з його збільшенням при включенні тричастинкових сил або при варіюванні параметра обрізання в πNN формфакторах, що входять в оператори мезонних обмінних струмів.

В розділі проведено також порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними та показано, що урахування мезонних обмінних струмів зменшує розбіжності між обчисленими та вимірними перерізами реакцій.

Таким чином, в дисертаційній роботі В.В. Котляра за допомогою методів, що належать квантовій теорії та математичній фізиці, розроблено нові методи для розрахунків амплітуд електромагнітних процесів за участю трьох частинок та нову модель двочастинкових мезонних обмінних струмів. На їх основі здобуто спостережувані для радіаційного захоплення протонів дейтронами, двочастинкового розщеплення реальними та віртуальними фотонами та порівняно результати розрахунків з експериментальними даними. Дисертація повною мірою відповідає спеціальності 01.04.02 - «теоретична фізика».

Обґрунтованість та достовірність здобутих результатів та висновків.

Для вирішення поставлених у дисертації завдань використовувалися добре апробовані методи теоретичної ядерної фізики, квантової теорії кутового моменту, математичної фізики та методи числових розрахунків, що зумовлює обґрунтованість та достовірність наукових положень і висновків дисертаційної роботи. Результати, які здобуто в дисертації, опубліковано у вітчизняних та зарубіжних журналах, представлено в доповідях на міжнародних конференціях та на семінарах у відомих зарубіжних інститутах, що є додатковим свідченням їх обґрунтованості та достовірності.

Наукова новизна роботи. Зазначу найголовніші результати, що здобуто вперше. В роботі розвинуто нові методи для дослідження двочастинкових механізмів радіаційного захоплення протонів дейтронами, фото- та електророзщеплення ядер ${}^3\text{He}$ та ${}^3\text{H}$, які дозволяють проводити розрахунки амплітуд в імпульсному представленні з використанням розв'язків тринуклонних рівнянь Фаддєєва для початкових і кінцевих станів реакцій. За допомогою запропонованих методів показано, що урахування двочастинкових

струмів, які генеруються π - та ρ -мезонними обмінами, помітно впливає на диференціальні перерізи та поляризаційні спостережувані в радіаційному захопленні протонів дейтронами та істотно зменшує відмінності між результатами розрахунків і експериментів. Розроблено нову модель мезонних обмінних струмів, яка включає в теорію ефекти сходу з енергетичної оболонки, та показано, в якій кінематичній області такі ефекти є важливими.

Практична цінність. Результати досліджень, які здобуто в дисертаційній роботі, поглибшують розуміння механізмів поглинання фотонів системою взаємодіючих нуклонів та спінової структури тричастинкових ядер. За допомогою методів, що розроблено в дисертації, розраховано перерізи та поляризаційні спостережувані в радіаційному захопленні протонів дейтронами та двочастинковому фоторозщепленні ядра ^3He та надано інтерпретацію результатів експериментів у Харкові та зарубіжних центрах. Результати досліджень становлять інтерес для розробки програм нових експериментів. Здобуті в роботі результати сприяли подальшому розвитку цієї області досліджень.

Розроблені методи можуть бути використані для дослідження багаточастинкових механізмів процесів із участю тричастинкових ядер, таких як, фото- та електронородження мезонів, розсіювання електронів, в якому порушується просторова парність.

Тензорне представлення для хвильової функції зв'язаного стану трьох нуклонів було використано в наступних роботах за участю автора. Тензорну хвильову функцію було виражено в термінах просторових, спінових та ізоспінових функцій, що перетворюються за незвідними представленнями симетричної групи, встановлено співвідношення між операторною формою Гержої-Швінгера та тензорною формою для хвильової функції а також запропоновано операторне представлення для хвильової функції у випадку, коли ядерні сили мають просторово-парні та просторово-непарні компоненти.

Зауваження до роботи. До змісту дисертації є такі зауваження рекомендаційного характеру:

1. В розділі 3 на сторінці 72 відмічено, що компоненти ХФ (3.10) є дійсними числами та не залежать від проекції повного моменту $3N$ -системи. Доцільно було б це пояснити.
2. В розділі 3.2 показано, що в ядрі ^3He поляризація нейтрона досягає значної величини $\sim 90\%$, проте поляризація протона практично відсутня ($<3\%$). Не завадило б додати в тексті пояснення, чому така сильна різниця між протоном і нейтроном у спінових станах.
3. У підрозділі 5.2 показано, що в інтервалі енергій фотона 120-300 MeV в переріз процесу радіаційного розпаду гелію 3 на протон і дейтрон основний вклад дають компоненти ФХ ядра ^3He з повним моментом двочастинкової підсистеми $J=0,1,2$. Вклади з $J=3,4$ не є суттєвими. Вважаю за доцільне привести кількісну оцінку останніх вкладів та навести деякі міркування про вклади більш високих моментів.
4. В тексті розділу 4.3 (зокрема підпис до рис.4.2) зустрічається величина A_y – векторна аналізуюча здатність протонів. Бажано б привести її означення.

5. Розділ 5. Рисунки 5.8, 5.10, 5.11, 5.12 містять забагато кривих, їх важко відрізнити.

Наведені зауваження мають виключно характер побажань і не знижують загальну високу оцінку роботи та важливість здобутих результатів.

Загальний висновок щодо дисертаційної роботи. Дисертація В.В. Котляра є закінченою науковою роботою, в якій розроблено нові методи в теорії електромагнітної взаємодії за участю трьох частинок та запропоновано нову модель струму нуклонів, на їх основі проведено розрахунки перерізів та поляризаційних спостережуваних у радіаційному захопленні протонів дейтронами, фото– та електророзщеплені ядра ^3He . В дослідженнях урахуються сучасні досягнення в розв'язанні рівнянь Фаддеева з реалістичними моделями ядерних сил та двочастинкові механізми реакцій. На основі обчислень надано інтерпретацію результатів експериментів.

Основні результати опубліковано в 8 статтях у фахових виданнях, чотири з них – у широко відомих журналах FewBodySystems, Phys. Rev. C та Nucl.Phys. A. Роботу виконано на високому науковому рівні, стиль викладання відповідає прийнятому в науковій літературі. Новизна та наукове значення здобутих результатів не викликають сумнівів, а опубліковані роботи й автореферат повною мірою відображають зміст, висновки дисертації і особистий внесок автора дисертаційної роботи.

Приймаючи до уваги високу актуальність обраної теми дослідження, наукову значимість та новизну результатів, які здобуто, їх достовірність і обґрунтованість висновків, вважаю, що дисертація «Електромагнітні процеси за участю тричастинкових систем», повністю задовольняє всім вимогам, що висуваються до кандидатських дисертацій згідно з «Порядком присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 656 від 19 серпня 2015 р., № 1159 від 30 грудня 2015 р., № 567 від 27 липня 2016 р.), а автор дисертаційної роботи, Котляр Володимир Вікторович, повною мірою заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико–математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
член-кореспондент НАН України,
заступник директора з наукової роботи
Інституту прикладної фізики НАН України



Холодов

Р.І.Холодов